

УДК 621.396.67.012.12

АЛГОРИТМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ, ИЗМЕРЕННОГО В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ АНТЕННЫ НА СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ, В ДАЛЬНЮЮ ЗОНУ, ОСНОВАННЫЙ НА ПРЯМОМ ВЫЧИСЛЕНИИ ФОРМУЛ СТРЭТТОНА И ЧУ**Н. В. АНЮТИН, К. И. КУРБАТОВ, И. М. МАЛАЙ, М. А. ОЗЕРОВ**

*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических
и радиотехнических измерений,
Россия, Менделеево, Солнечногорский р-н, Московская обл.*

Аннотация. В статье рассмотрена возможность прямого вычисления векторных форм интеграла Кирхгофа в алгоритмах преобразования электромагнитного поля гармонического излучения антенн из ближней зоны в дальнюю зону. Для сферической схемы сканирования электромагнитного поля в ближней зоне предложен простой алгоритм на основе интеграла, полученного из формул Стрэттона и Чу. С помощью математического моделирования исследованы методические погрешности предложенного алгоритма, обусловленные сделанными при его выводе допущениями. Полная погрешность оценивается в экспериментах по восстановлению амплитудных диаграмм направленности антенн. Для сравнения во всех экспериментах приведены результаты работы классического алгоритма, основанного на разложении электрического поля по сферическим модам. Показано, что в сравнении с ним точность предложенного алгоритма не хуже, сложность программирования меньше, а скорость выполнения больше при условии восстановления диаграммы направленности только в главных сечениях.

Ключевые слова: антенные измерения; диаграмма направленности; ближняя зона; амплитудно-фазовое распределение; сферическое сканирование

ВВЕДЕНИЕ

Для прямых измерений характеристик направленности антенн требуются измерительные комплексы, обеспечивающие для излучаемых электромагнитных волн условия, эквивалентные дальней зоне (ДЗ). С увеличением электрических размеров исследуемых антенн возрастает минимальное расстояние, соответствующее условиям ДЗ, что приводит к увеличению размеров измерительного комплекса и его удорожанию. Для таких условий широкое распространение получили антенные измерительные комплексы ближней зоны (БЗ), размеры которых определяются преимущественно габаритами исследуемых антенн. Характеристики направленности антенн в таких комплек-

сах измеряются косвенно с помощью алгоритмов преобразования электромагнитного поля из БЗ в ДЗ (БЗ-ДЗ алгоритмы).

Все известные БЗ-ДЗ алгоритмы основываются на различных формах интеграла Кирхгофа, который является выражением для электромагнитного поля в свободном пространстве через его известные значения на произвольной замкнутой поверхности S_m , охватывающей все источники. Существует множество эквивалентных записей интеграла Кирхгофа в скалярной и векторной формах, однако для упрощения последующего анализа воспользуемся наиболее наглядной из них — формулами Стрэттона и Чу в гауссовой симметричной системе единиц [1]:

DOI: [10.20535/S0021347019030026](https://doi.org/10.20535/S0021347019030026)

© Н. В. Анютин, К. И. Курбатов, И. М. Малай, М. А. Озеров, 2019

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Потехин, А. И. *Некоторые задачи дифракции электромагнитных волн*. М.: Сов. радио, 1948.
2. Yaghjian, A. "An overview of near-field antenna measurements," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 34, No. 1, p. 30-45, 1986. DOI: [10.1109/TAP.1986.1143727](https://doi.org/10.1109/TAP.1986.1143727).
3. Boesman, B.; Pissort, D.; Gielen, G.; Vandenbosch, G. A. E. "Fast and efficient near-field to near-field and near-field to far-field transformation based on the spherical wave expansion," *Proc. of IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility, EMC*, 16-22 Aug. 2015, Dresden, Germany. IEEE, 2015, p. 529-534. DOI: [10.1109/ISEMC.2015.7256218](https://doi.org/10.1109/ISEMC.2015.7256218).
4. D'Agostino, Francesco; Ferrara, Flaminio; Gennarelli, Claudio; Guerriero, Rocco; Migliozi, Massimo. "Two effective approaches to correct the positioning errors in a spherical near-field-far-field transformation," *Electromagnetics*, Vol. 36, No. 2, p. 78-93, 2016. DOI: [10.1080/02726343.2016.1136018](https://doi.org/10.1080/02726343.2016.1136018).
5. Neitz, Ole; Mauermayer, Raimund A. M.; Weitsch, Yvonne; Eibert, Thomas F. "A propagating plane-wave-based near-field transmission equation for antenna gain determination from irregular measurement samples," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 65, No. 8, p. 4230-4238, 2017. DOI: [10.1109/TAP.2017.2712180](https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2712180).
6. Cornelius, R.; Heberling, D. "Spherical wave expansion with arbitrary origin for near-field antenna measurements," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 65, No. 8, p. 4385-4388, 2017. DOI: [10.1109/TAP.2017.2708099](https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2708099).
7. Mauermayer, R. A. M.; Eibert, T. F. "Spherical field transformation above perfectly electrically conducting ground planes," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 66, No. 3, p. 1465-1478, 2018. DOI: [10.1109/TAP.2018.2794406](https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2794406).
8. D'elia, G.; Leone, G.; Pierri, R.; Schirizzi, G. "New method of far-field reconstruction from Fresnel field," *Electron. Lett.*, Vol. 20, No. 8, p. 342-343, 1984. DOI: [10.1049/el:19840232](https://doi.org/10.1049/el:19840232).
9. Petre, P.; Sarkar, T. K. "A planar near-field to far-field transformation using an equivalent magnetic current approach," *IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp. Dig.*, 18-25 Jul. 1992, Chicago, USA. IEEE, 1992, p. 1534-1537. DOI: [10.1109/APS.1992.221746](https://doi.org/10.1109/APS.1992.221746).
10. Yamaguchi, Ryo; Kimura, Yasuko; Komiya, Kazuhiro; Cho, Keizo. "A far-field measurement method for large size antenna by using synthetic aperture antenna," *Proc. of 3rd European Conf. on Antennas and Propagation*, 23-27 Mar. 2009, Berlin, Germany. IEEE, 2009, p. 1730-1733. URI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5067950>.
11. Quijano, J. L. A.; Vecchi, G. "Field and source equivalence in source reconstruction on 3D surfaces," *PIER*, Vol. 103, p. 67-100, 2010. DOI: [10.2528/PIER10030309](https://doi.org/10.2528/PIER10030309).
12. Krivosheev, Yu. V.; Shishlov, A. V.; Tobolev, A. K.; Vilenko, I. L. "Fresnel field to far field transformation using sparse field samples," *Proc. of Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory*, 28-30 Aug. 2012, Kyiv, Ukraine. IEEE, 2012, p. 237-242. DOI: [10.1109/MMET.2012.6331237](https://doi.org/10.1109/MMET.2012.6331237).
13. Eibert, T. F.; Kilic, E.; Lopez, C.; Mauermayer, R. A. M.; Neitz, O.; Schnattinger, G. "Electromagnetic field transformations for measurements and simulations," *PIER*, Vol. 151, p. 127-150, 2015. DOI: [10.2528/PIER14121105](https://doi.org/10.2528/PIER14121105).
14. Eibert, T. F.; Vojvodić, D.; Hansen, T. B. "Fast inverse equivalent source solutions with directive sources," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 64, No. 11, p. 4713-4724, 2016. DOI: [10.1109/TAP.2016.2606405](https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2606405).
15. Paulus, A.; Knapp, J.; Eibert, T. F. "Phaseless near-field far-field transformation utilizing combinations of probe signals," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 65, No. 10, p. 5492-5502, 2017. DOI: [10.1109/TAP.2017.2735463](https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2735463).
16. Tai, C.-T. *Dyadic Green Functions in Electromagnetic Theory*. IEEE, 1994.
17. Бахрах, Л. Д.; Колосов, Ю. А.; Курочкин, А. П. "Определение поля антенны в дальней зоне через значения поля в ближней зоне," *Антенны*, № 24, С. 3-14, 1976.
18. Silver, S. *Microwave Antenna Theory and Design*, Book 19. IET, 1984. DOI: [10.1049/PBEW019E](https://doi.org/10.1049/PBEW019E).
19. Brown, J. "A theoretical analysis of some errors in aerial measurements," *Proc. IEE - Part C: Monographs*, Vol. 105, No. 8, p. 343-351, 1958. DOI: [10.1049/pi-c.1958.0044](https://doi.org/10.1049/pi-c.1958.0044).
20. Lee, Jeong-Seok; Song, Tae-Lim; Du, Jin-Kyoung; Koo, Tae-Wan; Yook, Jong-Gwan. "A study on near-field to far-field transformation using Stratton-Chu formula," *J. Korean Institute Electromagnetic Eng. Sci.*, Vol. 24, No. 3, p. 316-323, 2013. DOI: [10.5515/KJKIEES.2013.24.3.316](https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2013.24.3.316).
21. Ding, Yu; Lin, Yang; De-Min, Fu; Qi-Zhong, Liu. "Analysis and simulation of system phase errors in

planar near-field measurements on ultra-low sidelobe antennas,” *Proc. of IEEE Int. Conf. on Ultra-Wideband*, 20-23 Sept. 2010, Nanjing, China. IEEE, 2010, Vol. 1, p. 1-4. DOI: [10.1109/ICUWB.2010.5614371](https://doi.org/10.1109/ICUWB.2010.5614371).

22. http://www.skard.ru/?page_id=5038.

23. Gibson, W. C. *The Method of Moments in Electromagnetics*, 2nd ed. CRC Press, 2014. URI:

<https://www.crcpress.com/The-Method-of-Moments-in-Electromagnetics/Gibson/p/book/9781482235791>.

24. Бахрах, Л.Д.; Кременецкий, С.Д.; Курочкин, А.П.; и др. *Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне*. Ленинград: Наука, 1985.

Поступила в редакцию 14.02.2018

После доработки 26.02.2019

Принята к публикации 04.03.2019